大型低温重力波望遠鏡に使用するレーザー光源の特徴*

大前 宣昭^{*1,2}・三尾 典克^{*1,3}

Characteristics of Laser System Used in Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope

Noriaki OHMAE^{*1,2} and Norikatsu MIO^{*1,3}

^{*1}Department of Advanced Materials Science, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan

^{*2}Current address: Department of Applied Physics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*3}Current address: Photon Science Center, University of Tokyo, 2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

(Received June 30, 2011, Accepted September 22, 2011)

In order to detect a gravitational wave, a kilometer-scale interferometer with a high-power, single-frequency laser with extremely low noises is required. In the Japanese gravitational wave detector named Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT), a single-frequency laser with an output power of more than 100 W will be used. The laser system used in LCGT consists of a master laser, an amplifier, a pre-modecleaner, a modulation system, and a modecleaner. The system also includes stabilization systems for laser intensity and frequency. We have already developed most of them. This article describes the characteristics of the laser system used in LCGT and the current status of our developments.

1. はじめに

重力波をとらえるために、**Fig. 1**に示すようなレーザー干渉計型の重力波検出器が世界各地に建設されている。干渉計を構成する鏡は振り子で懸架されており、その共振周波数以上の周波数では自由質量として振る舞う。この干渉計に重力波がやってくると、重力波の振動数に合わせて、干渉計の直交した2本の腕の長さが差動で変動する。重力波による干渉計の2本の腕の長さの差動の変動を、干渉縞の強度の変化として検出することにより、重力波を見ることができる。しかし、干渉計の腕の長さに対する重力波による腕の長さの変化 δL は、 $\delta L/L \approx 10^{-21}$ と程度と非常に小さいために、重力波を検出するためには、非常に長い腕をもつ干渉計を必要とする。2010年からスタートした日本の重力波検出器「大型低温重力波望遠鏡 (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope, LCGT)」計画では、腕の長さが $L = 3 \text{ km}$ の大きなレーザー干渉計を神岡鉱山の地下に建設する。

2. 大型低温重力波望遠鏡で必要とされるレーザー光源

レーザー干渉計において、レーザーは物差しと考えるとよい。レーザーの波長を物差しとして用いて、2本の腕の長さの差動の変動を見る。一般に、干渉計測用のレーザー光源には、単一空間モード、単一周波数で連続発振するレーザーが用いられる。さらに、偏光状態が安定で、強度や周波数の揺らぎが小さいことが必要とされる。重力波検出器で用いるレーザー光源にも同様の要求が課されるが、通常の場合の光源と比べて、高出力で強度や周波数の揺らぎが極端に小さく

Fig. 1 Laser interferometric gravitational wave detector.

なくてはいけないということが挙げられる。というのは、重力波の効果が非常に微弱なため、極めて小さな干渉縞の変化量を読み取るためには、光源のパワーで決まるショット雑音のレベルを下げなければならないからである。ショット雑音は、レーザーが干渉計に入射するポートとは反対のポートから入射する真空場の揺らぎがもたらすと考えることができる(**Fig. 2**)。マイケルソン干渉計において、波長 λ 、パワー P のレーザーを用いた場合のショット雑音による干渉縞の読み取り限界は、

$$\delta\phi_{shot} = \sqrt{\frac{4\pi\hbar c}{\lambda P}} \Delta f \quad (1)$$

で表される¹⁾。ここで、 c は光速、 $\hbar$ はプランク定数、 Δf は測定帯域幅である。ショット雑音による読み取り限界は、レーザーパワー P の平方根に反比例するため、レーザーパワー P を大きくすることで、読み取り精度が向上する。式(1)に対して、 $\delta\phi_{shot} = 10^{-10} \text{ rad}$ 、 $\lambda = 10^{-6} \mu\text{m}$ 、 $\Delta f = 1000 \text{ Hz}$ とすると、 $P = 1000 \text{ W}$ となりこれが重力波検出器に必要とされるレーザーのパワーである。 $P = 1000 \text{ W}$ というのは、

* 平成23年3月9日 第58回応用物理学関係連合講演会で発表

^{*1} 東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻(〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

^{*2} 現在：東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

^{*3} 現在：東京大学大学院工学系研究科附属光子科学研究センター(〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

レーザー加工機で用いるようなレーザーと同程度のパワーである。実際には、パワーリサイクリングと呼ばれる技術を用いることで、実効的に大きなレーザーパワーを用いた状態を実現できることから、現在建設中の第二世代と呼ばれる重力波検出器（Advanced LIGO（米）、Advanced Virgo（伊）、LCGT など）では、100～200 W の出力のレーザー光源を必要としている。100 W という数字は、通常の干渉計測で用いられるレーザー光源の出力が 1 mW 程度で十分であることを考えると、非常に大きな数字であることがわかる。

従来の重力波検出器では、10 W 程度のレーザーが用いられていた²⁾。第二世代重力波検出器ではショット雑音の改善のためにレーザーパワーを100 W 程度に増やす。しかし、100 W 程度の出力に達すると、輻射圧雑音と呼ばれるショット雑音と同じく真空場の揺らぎによる雑音が重力波検出器の感度を制限すると考えられている。輻射圧雑音とは、光が鏡で反射する際に運動量の変化分を鏡が受け取ることから、鏡に入射する光子の数が揺らぐと、鏡が受ける力が変化し、鏡の位置が揺らぐことで生じる雑音である。輻射圧雑音は、レーザーパワーの平方根に比例する。つまり、ショット雑音 ($\propto 1/\sqrt{P}$) と輻射圧雑音 ($\propto \sqrt{P}$) を考慮すると、最適なレー

ザーパワーが存在することがわかる。第二世代重力波検出器では、レーザーパワーに対して最適な状況を実現する。地面振動や熱雑音などのその他の雑音を極限的に小さくすると、干渉計型重力波検出器の感度は、最終的にショット雑音と輻射圧雑音だけで制限される。つまり、第二世代重力波検出器では、究極の干渉計測を実現するといっても過言ではない。

重力波検出器で必要とされるレーザー光源には、高出力かつ高品質であるに加えて、出力が変調されている必要がある。これは、干渉計にある動作点に保持するために、必要な制御信号を取得するためである。LCGT で用いるレーザー光源では、レーザーの高出力化、強度・周波数の安定化、変調などをすべて両立させたシステムである必要がある。以降の節で、日本の次世代重力波検出器「大型低温重力波望遠鏡 LCGT」で用いるレーザー光源の具体的な構成および開発の状況について紹介する。

3. 大型低温重力波望遠鏡で用いるレーザー光源の開発

LCGT で用いるレーザー光源の構成を Fig. 3 に示す。Fig. 3 のレーザーシステムにおいて、厳密な意味でのレーザーは、最初的主レーザーと増幅段の部分だけである。しかし、増幅後のレーザー出力に変調をかけたり、空間モードを整形したりなどを含めてレーザーシステムと位置付けて開発を進めている。

LCGT のレーザーシステムでは、まず比較的低出力ではあるが、低雑音で単一周波数発振するレーザー（主レーザーと呼ぶ）を増幅することで、出力200 W 程度の単一周波数出力を実現する。その後、プレモードクリーナーと呼ばれる光共振器を通すことで、空間モードのクリーニングおよび高周波（1 MHz 以上）の雑音の低減を行う。そして光変調器でレーザー光の変調を行い、モードクリーナーと呼ばれる光共振器で再度空間モードのクリーニングを行う。そして、干渉計に入射させる。以降の節で、各項目について解説する。

3.1 単一周波数レーザーの高出力化

重力波検出器では、高出力かつ単一周波数発振するレーザーを必要とする。そのために、低出力ではあるが周波数安

Fig. 2 Shot noise and radiation pressure noise in the interferometric measurement.

Fig. 3 Schematic diagram of the laser system used in LCGT.

定度の高い単一周波数レーザー（主レーザー）を増幅することで、高出力かつ高安定なレーザーを実現する。

3.1.1 主レーザー

第一世代重力波検出器（LIGO, Virgo, GEO600, TAMA300, CLIO など）の時代から、主レーザーには Nd : YAG の非平面リング共振器（Non-Planar Ring Oscillator, NPRO）が使用されてきた。NPRO はレーザー結晶内だけでモノリシックにリング共振器が構成され、さらに非平面な光路と外部磁場によるファラデー効果を利用することで、単一方向出力で、非常に安定度の高い単一周波数発振を実現している³⁾。レーザー結晶の温度調節や結晶に貼り付けたピエゾ素子を使用することで、レーザー周波数の制御ができることも特徴的である。Nd : YAG NPRO は最大出力 2 W のものまで市販されており、このような安定なレーザーの中では比較的出力が大きいが、重力波検出器での出力の要求を満たすものではない。そのため、このレーザーを増幅して使用する。

Nd : YAG レーザー以外にも、最近ではファイバーレーザーの技術の向上が著しい。Nd : YAG レーザーとほぼ同じ波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ 付近ならイッテルビウムドープファイバー（YDF）レーザー、波長 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 付近ならエルビウムドープファイバーレーザーの技術が飛躍的に進歩している。実際に YDF レーザーで、Nd : YAG の NPRO と同程度の雑音特性で、出力 100 mW 程度のものが市販されるようになってきている。Nd : YAG の NPRO と比べると出力は劣るが、高出力化にファイバー増幅器を用いる場合には、出力の大きさは十分であり、かつシステムとしての融合性にも長けている。重力波検出器用の光源には、これまで固体レーザーが使用されてきたが、このようなファイバーレーザー技術の導入が始まりつつある。

3.1.2 単一周波数レーザーの高出力化

単一周波数レーザーの高出力化の方法は、増幅器と注入同期に分けられる（Fig. 4）。また、どういうレーザー媒質（気体、固体、ファイバー、色素など）を用いるかというのも大事であり、重力波検出器で必要とされる、高出力・低雑音・単一周波数・単一横モードなどの要求をみたすものとして、固体レーザーもしくはファイバーレーザーがよく用いられる。

増幅器とは励起したレーザー媒質だけで構成され、主レーザーの光を通すことで、誘導放出を利用してレーザー光が増幅される。候補としては、固体レーザーによるものと、ファイバーレーザーによるものがあるが、どちらも共通して、共振器長の制御等の精密制御システムを必要としないことが、後に述べる注入同期と比べた際の利点である。

固体レーザーの増幅器は、横モードが悪化しやすいという欠点がある。重力波検出器では、高次の横モードは重力波検出器の感度を悪化させるので、モードクリーナーによって除去する。つまり、高次の横モード成分の増加は好ましくない。なので、数十ワットまでの中出力までの使用で使われたりする⁴⁾。逆に、高出力増幅時の信頼性が非常に高く、また簡単な構成で増幅でき、増幅器の増幅度を強度変調素子として使用するために、高出力化の最終段だけに使うことにも

Fig. 4 Laser amplifiers for high-power, single-frequency lasers. (top) Solid-laser amplifier, (middle) fiber laser amplifier, (bottom) injection locking.

適している。

ファイバーレーザーの増幅器では、長いレーザー媒質を用意できるために、増幅ゲインを大きくとることができる。また、シングルモードファイバーの使用や、大口径ファイバーでも曲げ損失を与えることで高次の横モードを抑えて動作させることが可能である。実際に 100 W を超える単一周波数出力を実現した例が報告されている⁵⁻⁷⁾。しかし、固体レーザー媒質と比べてファイバーのコア径は小さいので、ファイバーの損傷が起きたり、ファイバーの持つ非線形効果が雑音源になるので、出力を大きくすることが難しい。長期使用の観点でも、ダークニングが報告されており、これらの問題の解決が必要である。しかし、一度ファイバー内に光を閉じ込めてしまえば、アライメントの必要がないなど、ハンドリングの面での利点は非常に大きい。また、ファイバーレーザーは固体レーザーと比べて、冷却効率が高いので、冷却機構からのノイズが小さいことが予想される。将来的には、ファイバーレーザータイプの主レーザーと組み合わせることで、アライメントフリー、メンテナンスの簡単な、ユーザーフレンドリーなレーザー光源が実現されると思われる。

注入同期とは、自然放出光の代わりに、主レーザーを従レーザーに注入し、主レーザーの電場を従レーザー内で誘導放出により増幅させることで、主レーザーのモードだけを優先的に増幅し、従レーザーを主レーザーの周波数特性に追従するように発振させる方法である。従レーザーは、それだけでレーザー発振できるように共振器の構造をもつ。高出力レーザーを作る場合、レーザーはその構造が大きくなってしまい、レーザー単体で単一周波数発振させることは難しく、

エタロンなどの周波数選択素子を挿入する必要がある。しかし、複数周波数発振するようなレーザーであっても、注入同期を行うことでゲインを全て1つの周波数に集めることができ、単一周波数発振を実現できる。また、従レーザーは共振器構造をもつので、共振器の設計によって単一横モード発振を実現することができる。実際に、注入同期動作を行うためには、主レーザーと従レーザーのモード（周波数、空間モード、偏光）を合わせる必要がある。また、主レーザーを従レーザーに注入する際、主レーザーの光が従レーザー共振器内で共振するように、従レーザーの共振器長を精密に制御する必要がある。また、主レーザーと従レーザー間のアライメント、モードマッチングなども重要な調整要素となる。良い性能が得られる分、構成や調整が複雑になるという欠点がある。

我々は、固体レーザー（Nd:YAG）を用いて、注入同期による100 W出力の単一周波数発振のレーザーの開発を進めてきた⁸⁾。Fig. 5に装置の概略を示す。主レーザーには2 W出力のNd:YAG NPROを用いて、従レーザーには、側面励起のNd:YAGのロッドレーザーを用いている。従レーザー共振器には、レーザーロッド2本と水晶回転子を組み合わせたレーザーモジュールを2台用いている⁹⁾。このレーザーモジュールの構成により、高出力レーザーで問題となる熱複屈折の補償を行っている^{10,11)}。Fig. 6に示す通り、110 W以上の単一周波数出力を実現している。また、レーザー出力は単一横モード（TEM₀₀）（Fig. 7）で、偏光比も1:100以上と非常に高品質なものが得られた¹²⁾。

3.2 周波数安定化システム

重力波検出器は、2本の腕が直交したマイケルソン干渉計を基本としている。マイケルソン干渉計では両腕の長さの変動の差動成分が検出できる。これに対し、レーザーの周波数雑音は、両腕の長さの同相成分として現れる。つまり、非常に対称性のよい干渉計であれば、レーザーの周波数揺らぎが重力波の信号にとって雑音にならない。しかし、実際の重力波検出器では、重力波にとって敏感になるように、各腕にファブリペロー共振器を配置した構成（Fig. 1）となっており、その結果、周波数雑音にも敏感な構成となっている。実際に、重力波検出器でよく用いられるレーザー（Nd:YAG NPRO）の周波数を特に制御していない状態での周波数雑音の大きさは、100 Hzで約 10^2 Hz/rtHzである。これに対し、LCGTで要求されるレーザーの周波数雑音の大きさは、100 Hzで約 10^{-8} Hz/rtHzであり、およそ100億分の1にレーザーの周波数雑音を抑える必要がある。

レーザーの周波数揺らぎを100億分の1にするという、それだけ安定な周波数の基準を用意する必要があり、途方もない話に聞こえるが、実は、重力波検出器そのものが周波数の参照になる。というのも、重力波は干渉計の直交した2本の腕の長さの変動の差動成分として現れる一方、レーザーの周波数揺らぎは、腕の長さの変動の同相成分に現れるため、腕の長さ変動の同相成分はレーザーの周波数雑音として考えることができ、この同相信号を用いてレーザーの周波数を制御することで、非常に周波数雑音の小さなレーザーを実現できる。

Fig. 5 Schematic diagram of the 100-W injection-locked single-frequency Nd:YAG laser.

Fig. 6 Output power of the 100-W injection-locked single-frequency Nd:YAG laser.

Fig. 7 Output beam profile of the 100-W injection-locked single-frequency Nd:YAG laser.

それでも、基準に対してレーザーの周波数雑音を100億分の1にするのは簡単なことではない。しかも、100 Wもの出力のレーザーになると、熱の問題などで使用できる光学素子が限定されたりする。そこで、kmスケールの光共振器をテーブルトップに設置する代わりに、小型の光共振器を周波数参照として用いて、100 W出力の注入同期型単一周波数Nd:YAGレーザーの周波数制御実験を行った。重力波検出器での周波数制御には、広帯域（制御帯域約1 MHz）・高ゲイン（100 Hzで200 dB）であることが要求される。注入同期レーザーの周波数の制御は主レーザーのピエゾ素子および温度調節端子で行うが、それだけでは100 kHzを超える広帯域制御を行うことができない。そこで、電気光学位相変調器を用いて高速な制御を行った。高速な制御を実現させるため

に、この位相変調器には100 W もの高出力レーザーを入射させる必要があり、変調器に用いる電気光学結晶をきちんと選択する必要がある。我々は、定比組成 Mg 添加ニオブ酸リチウム (Mg : SLN) を用いた。通常の Mg 添加ニオブ酸リチウムと比べて、Mg : SLN は非常に吸収が小さく、高出力レーザーでの用途に適している¹³⁾。また、電気光学結晶の機械的な共振のために、2 mm 程度の小さなアパーチャのものを使用しなければならないので、ビーム径を小さくする必要があるが、Mg : SLN 製位相変調器は問題なく使用できることが分かった^{14,15)}。周波数制御信号のうち、1 Hz 以下の低周波の信号は主レーザーの温度調節端子に、1 Hz 以上 10 kHz 程度までは主レーザーのピエゾ素子、10 kHz 以上の高周波の信号を従レーザーの後に配置した Mg : SLN 製位相変調器にフィードバックすることで、制御帯域800 kHz もの広帯域な制御を実現した。また、100 kHz 以下の制御ゲインをブーストすることで、100 Hz で300 dB もの高ゲインな制御を実現した¹⁵⁾。このように、100 W もの高出力なレーザーであっても、通常の低出力な干渉計用レーザーと同じように周波数制御が可能であることを示した。

3.3 強度安定化システム

重力波検出器では干渉計はダークフリンジにロックして使用し、レーザーの強度雑音は重力波信号に現れないようにする。しかし、レーザー強度の揺らぎは、残留変位を介しての重力波信号にとっての雑音や、ミラーへの輻射圧の揺らぎになり、干渉信号に現れ重力波信号にとっての雑音になる。LCGT では、相対強度雑音 (強度の揺らぎ δP を強度 P で規格化したもの $\delta P/P$) で10 Hz で 2×10^{-9} 1/rtHz という極限的な強度安定度が要求される。このレベルの強度安定度を実現するためには、非常に高感度なセンシング技術を必要とする。

レーザーの強度安定化の方法自体は非常にシンプルである。光強度をフォトダイオードで検出して、揺らぎ成分だけを抽出して揺らぎを抑えるようにフィードバック制御するだけである。しかし、LCGT で要求される強度雑音レベルを実現するためには、強度揺らぎを検出する過程の中で混入する雑音の対策を十分に行う必要がある。たとえば、空気中で実験を行うと空気中の塵などによる光の散乱によりレーザーの強度揺らぎではない強度の揺らぎを検出し、フィードバック制御してしまうことになり、要求されるレベルに到達できない。ほかに、レーザー光の位置の揺らぎがフォトダイオード表面の量子効率の不均一性とカップルして、偽の強度揺らぎを生じたりすることも指摘されている。

LCGT 計画では増幅器の励起電流制御と外部変調器による制御を用いて行う予定である。電流引き込み回路を用いた増幅器の励起電流制御によるレーザーの強度安定化の実証実験を行い、制御帯域10 kHz 以上の制御を実現している¹⁶⁾。また、Advanced LIGO 用の光源の開発を進めているドイツのグループが、強度安定化に関する研究を精力的に行っており、out-of-loop で 2×10^{-9} 1/rtHz という非常に高い安定度を実現している^{17,18)}。

3.4 プレモードクリーナー

干渉計制御のために、Pound-Drever-Hall 法¹⁹⁾として知ら

Fig. 8 Pre-mode cleaner constructed by four mirrors.

れる変調・復調法を用いる。したがって、重力波の観測帯域 (10 Hz – 1 kHz) と同じ周波数のレーザーの強度雑音成分だけでなく、変調周波数付近 (10 MHz – 100 MHz) の強度雑音 (RF 強度雑音と呼ぶ) の大きさがそのショット雑音レベルより大きい場合、変調・復調を介して、重力波の観測帯域の雑音として混入することになる。そのために、RF 強度雑音の低減も行う必要がある。RF 強度雑音をアクティブに安定化することは、高速に応答するアクチュエータが必要なために難しい。そのため、RF 強度雑音の低減には、光共振器の透過光の特性を利用した、パッシブなフィルタリング効果を利用する²⁰⁾。RF 強度雑音の低減は変調器の前のプレモードクリーナーと呼ばれる光共振器で行う。光共振器は空間モードの選択性もあるので、このプレモードクリーナーでは、その名前の通り、RF 強度雑音の低減だけでなく、レーザー光の空間モードの整形も行う。

RF 強度雑音の低減性能は、共振器のフィネス (共振器内のレーザー増幅度を表すパラメータで鏡の反射率で決まる) が大きく、共振器長が長い方がよい。しかし、使用するレーザーパワーが大きいため、熱による変形・破損等を考慮すると、フィネスをあまり大きくできない。また、共振器長を長くしすぎると、取扱いが非常に難しくなる。そのため、LCGT で用いるプレモードクリーナーでは4枚の鏡をスペーサーに貼り付けた光共振器を用いる (Fig. 8)。スペーサーに鏡を貼り付けることで、鏡の揺れを非常に小さくすることができる。また、4枚の鏡のうち1枚にピエゾ素子をつけることで、レーザー光が常に共振するように共振器長を制御する。

3.5 光変調システム

LCGT のような第二世代重力波検出器では、重力波に対して高感度になるように、Fig. 1 に示す通りたくさんの鏡を用いた複雑な干渉計の構成を用いる。また、干渉計にある動作点で動作させるために、干渉計を構成する各鏡間の距離および各鏡の角度を制御する。長さの制御が5自由度、また各鏡の傾きの制御も必要であり、制御すべき自由度が非常に多い。これらの制御を行うためには、動作点からの誤差を表す信号 (エラー信号) を取得する必要がある。エラー信号の取得のために、干渉計に入射させるレーザー光にあらかじめ変調をかけておく必要がある。

LCGT では制御すべき自由度が多いことから、変調も複雑なものが要求される。通常、1つの干渉計や光共振器の制御には1つの位相変調が用いられる。しかし、LCGT では位相変調だけでなく、振幅変調など変調の種類が増え、さらに複数の変調を必要とする²¹⁾。そのとき、振幅変調などは位相変調とは異なり、レーザーパワーの損失を伴う。このこ

Fig. 9 Schematic diagram of the low loss amplitude modulation system with delayed coherent addition. EOAM; electro-optic amplitude modulator, QWP; quarter wave plate, HWP; half wave plate, PBS; polarizing beam splitter, BS: beam splitter.

とはレーザーの出力への要求を厳しくする。そこで、レーザーパワーの損失のない振幅変調システムの開発を行った。

Fig. 9 にその概略を示す。通常の振幅変調の際に損失となる光に着目し、時間遅延をつけてコヒーレントに加算することで、通常は損失となる成分を再利用できることを実験的に示した²²⁾。

3.6 モードクリーナー

変調器を通過した光は、干渉計入射直前でモードクリーナーによって空間モードを整形 (TEM_{00} だけに) する。そのとき、光変調器で発生させた変調サイドバンドも通過させる必要がある。そのために、モードクリーナーのフリースペクトルレンジ (共振器長で決まる値) が、変調周波数の整数倍になるような、比較的長い共振器長を必要とする。LCGT では一周長約53 m (フリースペクトルレンジは約5.6 MHz) のモードクリーナーを使う予定で、3枚の鏡を使用した三角共振器を用いる。このような大きな光共振器の場合、各ミラーを独立に振り子で吊って、真空装置内に配置することが必須となる。

モードクリーナーを通過した光は、干渉計からの戻り光を分離するアイソレータを通過し、干渉計へと導かれる。

4. ま と め

日本の次世代重力波検出器「大型低温重力波望遠鏡 LCGT」で使用するレーザー光源の開発に関して述べた。一言でレーザー光源といっても、その中には主レーザー、増幅器、プレモードクリーナー、光変調器、モードクリーナーおよび強度・周波数の安定化システムがあり、非常に複雑な技術の集合体である。我々はこれまで、これらの技術の開発を一つずつ進めてきた。大型低温重力波望遠鏡 LCGT の建設が始まった今、レーザーに限らず、低温技術、鏡の懸架技

術、真空装置などすべての究極技術を神岡鉱山の地に集合させ、ぜひ世界初の重力波検出を実現させたい。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省「光・量子科学研究拠点形成に向けた基盤技術開発 最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」、および科学研究費補助金 (特別研究員奨励費20・7095) の支援によって実施いたしました。

【文 献】

- 1) T. Nakamura, N. Mio and M. Ohashi: Jyuryokuha wo Toraeru (Kyoto University Press, Kyoto, 1998)
- 2) S. T. Yang, T. Imai, M. Oka, N. Eguchi and S. Kubota: Opt. Lett., **21** (1996) 1676.
- 3) T. J. Kane and R. L. Byer: Opt. Lett., **10** (1985) 65.
- 4) M. Frede, B. Schulz, R. Wilhelm, P. Kwee, F. Seifert, B. Willke and D. Kracht: Opt. Express, **15** (2007) 459.
- 5) A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer and T. Tunnermann: Opt. Lett., **28** (2003) 1537.
- 6) Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu, D. B. S. Soh, C. Alegria, P. Dupriez, C. A. Codemard, D. N. Payne, R. Horley, L. M. B. Hickey, L. Wanzcyk, C. E. Chryssou, J. A. Alvarez-Chavez and P. W. Turner: Opt. Lett., **30** (2005) 459.
- 7) M. Hildebrandt, M. Frede, P. Kwee, B. Willke and D. Kracht: Opt. Express, **14** (2006) 11071.
- 8) K. Takeno, T. Ozeki, S. Moriwaki and N. Mio: Opt. Lett., **30** (2005) 2110.
- 9) S. Konno, S. Fujikawa and K. Yasui: Appl. Phys. Lett., **70** (1997) 2650.
- 10) Q. Lu, N. Kugler, H. Weber, S. Dong, N. Muller and U. Wittrock: Opt. Quantum Electron., **28** (1996) 28.
- 11) R. Hua, S. Wada and H. Tashiro: Opt. Commun., **232** (2004) 331.
- 12) N. Ohmae: Ph.D Thesis, The University of Tokyo (2011).
- 13) N. Ohmae, K. Takeno, S. Moriwaki and N. Mio: Appl. Phys. Express, **1** (2008) 012005.
- 14) N. Ohmae, K. Takeno, S. Moriwaki and N. Mio: Appl. Phys. Express, **1** (2008) 092601.
- 15) N. Ohmae, S. Moriwaki and N. Mio: Rev. Sci. Instrum., **81** (2010) 073105.
- 16) N. Mio, K. Machida, T. Ozeki and S. Moriwaki: Jpn. J. Appl. Phys., **46** (2007) 5338.
- 17) F. Seifert, P. Kwee, M. Heurs, B. Willke and K. Danzmann: Opt. Lett., **31** (2006) 2000.
- 18) P. Kwee, B. Willke and K. Danzmann: Opt. Lett., **34** (2009) 2912.
- 19) R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley and H. Ward: Appl. Phys. B, **31** (1983) 97.
- 20) B. Willke, N. Uehada, E. K. Gustafson, R. L. Byer, P. J. King, S. U. Seel and R. L. Savage Jr.: Opt. Lett., **23** (1998) 1704.
- 21) F. Kawazoe, A. Sugamoto, V. Leonhardt, S. Sato, T. Yamazaki, M. Fukushima, S. Kawamura, O. Miyakawa, K. Somiya, T. Morioka and A. Nishizawa: Class. Quantum Grav., **25** (2008) 195008.
- 22) N. Ohmae, S. Moriwaki and N. Mio: Opt. Lett., **36** (2011) 238.